نشریه‌ی علمی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

ارزیابی ریسک ایستگاه‌های مترو در مواجهه با تهدیدات انسان‌ساخت و مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران)

علی مرتضایی[1*]؛ علی عزیزی[2]؛ غلامحسین بیابانی[3]

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه و پژوهشگاه عالی دفاع ملی و تحقیقات راهبردی، پژوهشگاه علوم و معارف دفاع مقدس، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
۲- استادیار، گروه پیشگیری انتظامی، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه کشف جرائم، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

واژگان کلیدی

ارزیابی ریسک، ایستگاه‌های مترو، کلان‌شهر تهران، تهدیدات، مخاطرات، رمکپ‌پلاس

چکیده

زیرساخت حمل‌ونقل شهری به‌خصوص سامانه متروی کلان‌شهر تهران که روزانه برای جابه‌جایی میلیون‌ها نفر مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌های کشور شناخته می‌شود. هرگونه اخلال در فعالیت شبکه مترو می‌تواند به تأثیرات گسترده‌ای در سایر زیرساخت‌های مرتبط، از جمله شبکه حمل‌ونقل عمومی و سیستم توزیع برق داشته و همچنین به نارضایتی‌های اجتماعی منجر شود. در این راستا، در پژوهش حاضر دارایی‌های حیاتی (از جمله انسانی، فیزیکی و سایبری) ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران تحت ارزیابی ریسک به روش رمکپ‌پلاس قرار گرفته است. بازه گسترده‌ای از تهدیدات انسان‌ساخت و مخاطرات طبیعی و همچنین پیامدهای آنها به‌صورت کمّی در ایستگاه‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. با محاسبه مقادیر کمّی آسیب‌پذیری و احتمال وقوع رویدادها، عدد ریسک به‌صورت کمّی محاسبه شد. نتایج نشان دادند که خطرپذیرترین دارایی‌ها در میان سرمایه‌های فیزیکی و سایبری، سیستم سیگنالینگ، واگن‌های قطار، اتاق کنترل، پله‌های برقی، سامانه پست فشار قوی اختصاصی از شبکه توزیع برق و همچنین سیستم هدایت آب ایستگاه‌ها بودند. برای سرمایه‌های انسانی نیز مسافرین و کارکنان در بخش‌های سکو، ورودی‌های ایستگاه و سالن فروش بلیط مشمول خطرپذیرترین دارایی‌ها می‌شوند. همچنین مهم‌ترین تهدیدات و مخاطراتی که در صدر جدول پرتکرارترین و مخاطره‌آمیزترین‌ها بودند به‌ترتیب شامل تروریست‌ها (اعم از انتحاری و بمب‌گذاری گروهی)، وسایل نقلیه بمب‌گذاری شده در محیط ورودی ایستگاه‌ها، خرابکاری‌های فیزیکی و سایبری، آلودگی‌ها و دزدی سایبری برای بخش تهدیدات تروریستی و سیل و زلزله برای بخش مخاطرات طبیعی می‌شوند.

۱- مقدمه

زیرساخت حمل‌ونقل شهری، به‌خصوص سامانه متروی کلان‌شهر تهران وظیفه انتقال میلیون‌ها نفر به‌صورت روزانه را دارد و علاوه بر جا دادن این دارایی‌های انسانی، دربرگیرنده مقادیر قابل توجهی دارایی‌های فیزیکی و سایبری می‌باشد که هر یک از این موارد در مواجهه با تهدیدات انسان‌ساخت (اعم از فیزیکی و سایبری) و مخاطرات طبیعی دارای مقادیر خطرپذیری یا ریسک مشخص هستند. از این‌رو این زیرساخت یکی از حیاتی‌ترین زیرساخت‌ها به شمار می‌رود.

سامانه مترو شامل سه قسمت اصلی ایستگاه‌ها، تونل‌ها و تعمیرگاه‌ها می‌شود که در این پژوهش ایستگاه‌های متروی

* این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی پژوهشگاه علوم و معارف دفاع مقدس می‌باشد.

نویسنده مسئول: رایانامه: Alimortezaei1396@gmail.com

کلان‌شهر تهران به‌عنوان مهم‌ترین مرکز تجمع دارایی‌ها با استفاده از دستورالعمل به‌روز شده و بومی‌سازی شده ارزیابی و مدیریت ریسک دارایی‌های حیاتی یا به‌اختصار رمکپ‌پلاس (*Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection: RAMCAP Plus*) مورد ارزیابی قرار گرفته است (*ASME-ITI, 2009*).

روش رمکپ‌پلاس علاوه بر دقت نظر فراوان در بخش آب و فاضلاب در بسیاری از زیرساخت‌های حیاتی دیگر همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، بخش پتروشیمی و صنعت حمل‌ونقل هوایی به کار برده شده است. این موضوع نشان‌دهنده قابلیت تطبیق‌پذیری بالای این دستورالعمل برای به‌کارگیری در اکثر زیرساخت‌های حیاتی یک کشور می‌باشد.

هرگونه اختلال در خطوط متروی کلان‌شهر تهران، می‌تواند عملکرد سایر زیرساخت‌های مرتبط از جمله باقی روش‌های حمل‌ونقل شهری همچون خطوط اتوبوس‌رانی و تاکسیرانی، شبکه توزیع برق شهری و شبکه مخابراتی را دچار اختلالات گسترده کند. این موضوع در شهری همچون کلان‌شهر تهران با توجه به جای دادن جمعیت فراوان و کاربری‌های متنوع اهمیت دو چندانی پیدا می‌کند (*Pursiainen, 2018*) و (*Robert, et al., 2021*).

علاوه بر موارد ذکر شده، ایجاد هرگونه بحران در ایستگاه‌های مترو می‌تواند به نارضایتی‌های ملی، از بین رفتن اعتماد مردم به زیرساخت‌های شهری، ضررهای اقتصادی جامعه‌ای و بسیار مواردی از این دست شود.

در این پژوهش اکثر تهدیدات انسان‌ساخت و مخاطرات طبیعی مؤثر بر دارایی‌های ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران بررسی شده است و از حیث جامعیت و ارائه اطلاعات یکی از کامل‌ترین پژوهش‌های زمینه ارزیابی ریسک شبکه حمل‌ونقل عمومی زیرزمینی می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند درک صحیحی از میزان آسیب‌پذیری دارایی‌های ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران، میزان پیامدهای حاصل از وقوع هر یک از تهدیدات و مخاطرات در این ایستگاه‌ها ارائه دهد. در نهایت با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان پیشنهادهایی راهبردی به جهت کاهش ریسک‌های شناسایی شده به جهت پیشگیری از ایجاد بحران و در کمترین حالت تسهیل مدیریت بحران در ایستگاه‌های مذکور ارائه نمود.

تمامی دارایی‌های شناسایی شده در ایستگاه‌ها، تیم‌های ارزیابی و مطالعات جمعیتی با بررسی ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران صورت گرفته است.

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات فراوانی در زمینه ارزیابی ریسک ایستگاه‌های مترو و شبکه حمل‌ونقل با استفاده از دستورالعمل‌های متفاوت ارزیابی ریسک در ایران و جهان انجام شده است که در این بخش به ارائه گزیده‌ای از مهم‌ترین و اثرگذارترین مقالات داخلی و سپس مقالات خارجی پرداخته شده است:

جلالی فراهانی و همکاران (۲۰۱۴) به تحلیل و رتبه‌بندی تهدیدات انسان‌ساخت در ایستگاه‌های مترو با استفاده از روش توصیفی - تحلیلی و از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و پرسشنامه پرداخته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که بمب‌گذاری به‌عنوان اصلی‌ترین تهدید در ایستگاه‌های مترو شناسایی شده است (*Jalali, et al., 2014*).

قنادی تقی‌زاده و باقری (۲۰۲۱) آسیب‌پذیری ایستگاه‌های متروی نیمه شمالی خط یک کلان‌شهر تهران را در برابر تهدیدات شیمیایی تروریستی بررسی کرده‌اند. برای تحلیل داده‌ها از فرایند تحلیل شبکه‌ای به‌عنوان ابزار پردازش به‌منظور رتبه‌بندی ایستگاه‌ها و شاخص‌ها استفاده شد. طبق رتبه‌بندی انجام شده، معیار عملکرد انسانی نقشی واضح به‌منظور کاهش میزان آسیب‌پذیری ایستگاه‌ها دارد (*Ghanadi & Bagheri, 2021*).

زرقانی و نسیمی (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر اقدامات بیوتروریستی بر زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهند که در عملیات بیوتروریستی، امکان آلودگی زیرساخت‌های حمل‌ونقل شهری در بخش‌های مختلف از جمله هوایی، ریلی و جاده‌ای وجود دارد. این حملات می‌توانند با استفاده از عوامل بیولوژیک کشنده و بیماری‌زا صورت گیرد (*Zarghani, et al., 2021*).

شیعه و همکاران (۲۰۲۰) در زمینه ارزیابی خطرپذیری و آسیب‌پذیری گسترش شبکه حمل‌ونقل ریلی در شهر تهران با تمرکز بر مسائل مرتبط با مخاطرات کالبدی و فضایی ایستگاه‌های متروی تجریش، نواب صفوی و دروازه

شمیران تحت مخاطره زمین‌لرزه انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تمامی ایستگاه‌های ذکر شده در محدوده آستانه خطر قرار دارند و نیاز به اتخاذ تدابیر هوشمند در تمامی مراحل قبل، حین و بعد از بحران زمین‌لرزه دارند (*Shieh, et al., 2020*).

قادری و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش کیفی تحلیل آثار و حالات شکست محیط زیستی (ایفما) (*Environmental Failure Mode and Effects Analysis: EFEMA*)، چهار پایانه متروی صادقیه، مهرشهر، فتح‌آباد و دردشت را از منظر فعالیت‌های تعمیرات دوره‌ای اساسی و نیمه‌اساسی آن و نگهداری قطارها در نظر گرفته است. هدف این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی جنبه‌های زیست‌محیطی بوده است (*Ghaderi, et al., 2015*).

مرتضوی و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه‌ای به جهت ارزیابی ریسک حاصل از حریق در خط ۱ متروی کلان‌شهر تهران صورت پذیرفت. شیوه کار بدین‌صورت بود که با مشاهده، مصاحبه با کارشناسان مترو و بررسی مستندات، انواع منابع ایجاد حریق در ایستگاه‌های مترو شناسایی شده و پس از آن با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، خطر حریق الکتریکی در پست‌های یکسوساز، مهم‌ترین نوع خطر تعیین گردید و همچنین با تحلیل کمی درخت خطا، میزان احتمال وقوع خطر برای یک سال محاسبه شد (*Mortazavi, et al., 2014*).

در زمینه مقالات خارجی به موارد زیر می‌توان اشاره نمود:

ونگ و لیو (۲۰۲۲) یک روش مدیریت ریسک برای امنیت سایبری در سیستم‌های فیزیکی-سایبری مختلف ریلی فرموله نموده و یک مطالعه موردی گذشته‌نگر که بر روی سیستم کنترل پیشرفته قطار که در بسیاری از راه‌آهن‌های باری ایالات‌متحده مستقر شده است، انجام داده است. این روش دو رویکرد جایگزین را برای پر کردن شکاف‌های دانش در دست توسعه، پیشگیری از تهدید، تجزیه‌وتحلیل پیامدها و کاهش ریسک‌های امنیتی ارائه می‌دهد (*Wang & Liu, 2022*).

لی و همکاران (۲۰۲۲) احتمال انتقال عفونت کرونا در متروها را با استفاده از مدل بهبود یافته مبتلا حساس به عفونت (سیر) (*Susceptible Exposed Infected Recovered: SEIR*) بررسی کرده‌اند. این مدل عواملی مانند ضدعفونی مترو، ظرفیت تهویه هوا، فاصله میان مسافران، زمان سفر، ظرفیت انتقال و تغییرات تعداد مسافران را در نظر گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش زمان سفر، خطر ابتلا به عفونت برای افراد حساس به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، فاصله میان مسافران و تهویه مناسب نیز نقش مهمی در کاهش خطر ایفا می‌کند (*Li, et al., 2022*).

ونگ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از چهار مرحله انتخاب ریسک‌های محتمل و تجمیع آن با یک سیستم لایه‌بندی (*GIS*)، وزن‌دهی نمایانگرهای مرحله قبل با استفاده از ابزار تحلیل سلسله‌مراتبی، تولید سطوح ریسک سیل در شهر پکن بر پایه وزن هر لایه و در نهایت استخراج سطوح ریسک سیل در خطوط متروی این شهر با استفاده از سطوح مرحله قبل انجام شد. این یافته‌ها با استفاده از نتایج تاریخی اعتبار سنجی شده‌اند (*Wang, et al., 2021*).

یان (۲۰۱۸) با استفاده از روش «المان محدود (*Finite Element*)» یک مدل همبسته شامل (انفجار- هوا- بتن) را ایجاد و امکان‌سنجی مدل شبیه‌سازی ایستگاه مترو را از طریق آزمایش‌ها تأیید کرد. این مدل می‌تواند در ارزیابی آسیب ستون‌های ایستگاه مترو از نظر ظرفیت باربری مورد استفاده قرار گیرد که توسط آن آسیب سازه‌ای یک ستون بتن مسلح را می‌توان به سطوح مختلف تقسیم نمود. علاوه بر موارد ذکر شده، تأثیر پارامترهای متفاوت بر آسیب و ظرفیت باربری ایستگاه مترو مورد بحث قرار گرفته است (*Yan, 2018*).

همچنین در زمینه حوادث رخ داده اعم از انسان‌ساخت و طبیعی و اطلاعات آماری آنها در ایستگاه‌های مترو در سراسر جهان به مقاله یو و همکاران (۲۰۱۹) مراجعه شود (*Yu, et al., 2019*).

۳- چارچوب نظری

۳-۱- پیشینه رمکپ‌پلاس

شرح نسخه اولیه رمکپ در سال ۲۰۰۵ به‌عنوان «چارچوب رمکپ» شناخته شد (*Brashear, et al., 2007*) و نسخه بعدی به‌عنوان چارچوب رمکپ نسخه ۲,۰ (۲۰۰۶)

به‌روزرسانی گردید. این دستورالعمل بر اساس تجربه به‌دست‌آمده از توسعه پنج سند آغازین راهنمای بخش محور از صنایع مورد بررسی می‌باشد (برای نیروگاه‌های هسته‌ای، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی سوخت مصرفی، پالایش نفت و تولید مواد شیمیایی، بنادر تخلیه گاز طبیعی مایع). (*ASME-ITI, 2009*) نسخه ۲,۰ به‌طور گسترده‌ای برای سدها، آب‌بندهای ناوبری و سیستم‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت و بررسی‌های فراوانی بر روی آن انجام شد (*Chen, et al., 2020*).

همانند توسعه چارچوب اولیه، تجربه‌های قبلی و دو بخش ذکر شده که پس از توسعه چارچوب اولیه در نسخه ۲,۰ اضافه شد، ایجاد پیش‌نویس رویکرد رمکپ‌پلاس شامل اصلاحات و اضافات زیر می‌باشد:

۱. احتمال وقوع، آسیب‌پذیری و پیامدهای مخاطرات طبیعی؛
۲. توجه بیشتر به وابستگی‌های فوری ناشی از زنجیره تأمین و نزدیکی آن؛
۳. شناخت ساده و صریح نقش تاب‌آوری (توانایی مقاومت در برابر چیزی یا بازگرداندن سریع عملکرد به دارایی‌های حیاتی پس از یک حمله یا رویداد طبیعی) که بر حسب مدت و شدت رد تقاضای خدمات و تأثیر اقتصادی بر جامعه اندازه‌گیری می‌شود؛
۴. تأثیرات اقتصادی با دیدگاه دوگانه، برآورد تأثیرات هم بر صاحبان زیرساخت‌ها و هم بر جامعه‌ای که این زیرساخت‌ها به آنها خدمت‌رسانی می‌کنند؛
۵. تجزیه‌وتحلیل سود و هزینه برای مالک و جامعه؛
۶. مرجع عمومی تهدید آلودگی محصول (که توسط بخش آب ضروری است، اما برای باقی زیرساخت‌ها نیز قابل استفاده است)؛ و
۷. بحث‌های گسترده در مورد مراحل چندگانه فرآیند رمکپ‌پلاس.

هدف نهایی کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری زیرساخت می‌باشد.

۳-۲- مؤلفه‌های دستورالعمل رمکپ‌پلاس

بر اساس تعریف، ریسک مقدار مورد انتظار از پیامدهای حملات تروریستی و رخدادهای طبیعی می‌باشد که بر اساس محتمل بودن آن رخداد و احتمال شرطی حاصل از آن که توسط پیامدهای تخمین زده شده صورت گرفته است، وزن‌دهی می‌شود. این تعریف از ریسک توسط وزارت امنیت داخلی ایالات‌متحده آمریکا (*Department of Homeland Security:DHS*) توسعه یافته است. فرآیند رمکپ‌پلاس به نحوی اصطلاحات و معیارها را تدوین کرده است که برای هر نوع تحلیلی که بر مبنای آن انجام می‌شود، امکان مقایسه مستقیم داده‌ها و اطلاعات را فراهم می‌کند. این روند می‌تواند به دارایی‌های مختلف، مجموعه‌های دارایی‌ها یا حتی سیستم‌های دارایی‌ها اعمال شود. این روش تحلیل به افراد و سازمان‌ها این امکان را می‌دهد که با توجه به نیاز خود، دارایی‌های مختلف را با هم مقایسه کرده و تصمیم‌گیری‌های بهتری انجام دهند. بدین‌ترتیب، تخصیص منابع به‌صورت بهتری انجام خواهد شد.

۳-۲-۱- ریسک

به‌عنوان احتمال از دست دادن یا آسیب ناشی از وقوع یک رویداد نامطلوب و پیامدهای ناگوار آن تعریف می‌شود. در مورد فرآیند رمکپ‌پلاس و سایر فرآیندهای ارزیابی ریسک، ریسک به‌عنوان محصولی از ترکیب تهدید، آسیب‌پذیری و پیامدهای آن تعریف می‌شود. با محاسبه مقدار احتمال تهدید، میزان آسیب‌پذیری و پیامدها می‌توان ریسک را به‌صورت کمّی محاسبه کرد.

ریسک = (تهدید) × (آسیب‌پذیری) × (پیامد)؛

یا

$$R\,(\text{Risk}) = C\,(\text{Consequence}) \times V\,(\text{Vulnerability} \times T\,(\text{Threat}))$$

۳-۲-۲- تهدید (*T*)

هر علامت، شرایط یا رویدادی که ممکن است به دارایی فیزیکی، سایبری و یا انسانی صدمه بزند، به‌عنوان تهدید شناخته می‌شود.

۳-۲-۳- آسیب‌پذیری (*V*)

آسیب‌پذیری به هر نوع ضعف یا نقطه‌ضعف در طراحی،

استفاده، یا عملکرد یک دارایی یا زیرساخت اشاره دارد که می‌تواند توسط دشمن مورد سوءاستفاده قرار گیرد و یا به شکست عملکردی در نتیجه یک بلای طبیعی منجر شود. در این مقاله برای اندازه‌گیری آسیب‌پذیری از روش درخت رویداد بهره گرفته شده است.

۳-۲-۴- پیامدها (C)

پیامد وقوع یک رویداد، شامل ضررها و اثرات فوری، کوتاه‌مدت و بلندمدت، مستقیم و غیرمستقیم می‌شود. خسارات و ضررها و زیان‌ها ممکن است شامل تلفات و جراحات انسانی، خسارات مالی و اقتصادی و اثرات زیست‌محیطی باشند که به‌طورکلی می‌توان آنها را به‌صورت کمّی تخمین زد. پیامدها همچنین ممکن است شامل تأثیرات کمتر ملموس و کمتر قابل سنجش باشد. به‌عنوان‌مثال می‌توان به پیامدهای سیاسی، کاهش روحیه جمعی، کاهش اثربخشی عملیاتی یا آمادگی نظامی یا تأثیرات دیگر اشاره نمود.

۳-۳- فرآیند رمکپ‌پلاس

فرآیند رمکپ‌پلاس از هفت گام تحلیلی به شرح زیر تشکیل شده است:

۱. مشخصه‌سازی دارایی- اینکه کدام تسهیلات و دارایی‌ها برای عملکرد مأموریت یا عملیات ایستگاه‌های حیاتی می‌باشند؛
۲. مشخصه‌سازی تهدید- تعیین تهدیدهای خاص برای هر دارایی؛
۳. تجزیه‌وتحلیل پیامدها- تخمین بدترین نتایج منطقی هر تهدید برای هر دارایی؛
۴. تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری- تخمین احتمال اینکه هر حمله به هر دارایی منجر به پیامدهای پیش‌بینی شده، با توجه به وقوع رویداد و در نظر گرفتن اثربخشی اقدامات امنیتی موجود شود؛
۵. ارزیابی تهدید- تخمین و برآورد احتمال یا تحقق‌پذیری وقوع رویداد آغازگر؛
۶. ارزیابی ریسک- تخمین ریسک و تاب‌آوری مرتبط با هر رویداد و تهدید در هر دارایی؛
۷. مدیریت ریسک- ارزیابی گزینه‌های کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری بر اساس ارزش آنها (معمولاً سود- هزینه) و انتخاب، اجرا و مدیریت موارد انتخاب شده.

۴- روش‌شناسی تحقیق

۴-۱- شاخص‌ها و مدل مفهومی

پژوهش حاضر بر اساس هدف کاربردی بوده و از لحاظ ماهیت توصیفی- تحلیلی می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز به‌وسیله مطالعات کتابخانه‌ای، میدانی و طرح پرسشنامه‌هایی در هر قسمت جمع‌آوری شده است. آمار جامعه خبرگان متشکل از ۲۲ خبره در جدول ۱ ارائه شده است. برای هر گام از ابزاری مخصوص به‌منظور دستیابی به نتایج مطلوب بهره گرفته شد که در ادامه به تمامی آنها اشاره می‌شود.

جدول ۱- ترکیب جامعه خبرگان (منبع: نویسندگان).

تخصص	تحصیلات	تعداد
مهندس عمران - سازه	کارشناسی ارشد	۲
مهندس عمران - زلزله	کارشناسی ارشد	۴
مهندس عمران - مدیریت ساخت	کارشناسی ارشد	۳
مهندس مکانیک - تأسیسات	کارشناسی ارشد	۱
مهندس عمران - پدافند غیرعامل	کارشناسی ارشد	۲
مهندس عمران - محیط‌زیست	کارشناسی ارشد	۲
مهندس عمران – راه و ترابری	کارشناسی ارشد	۱
اقتصاد	کارشناسی	۲
مهندس کامپیوتر و برق	کارشناسی ارشد	۲
مهندس عمران	کارشناسی	۳

مدل مفهومی این پژوهش در نمودار شکل ۱ به نمایش درآمده است. در این پژوهش، برای گام اول یعنی مشخصه‌سازی دارایی‌های ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران، پس از ضرورت فهرست شدن تمامی دارایی‌های موجود، نیاز به غربالگری دارایی‌هایی که برای تداوم فعالیت سیستم حیاتی محسوب می‌شوند، احساس شد. بدین‌منظور با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل ارزیابی گام‌به‌گام اوزان (*Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis*)، معیارهای انتخاب دارایی‌ها وزن‌دهی و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره با وزن‌دهی ساده

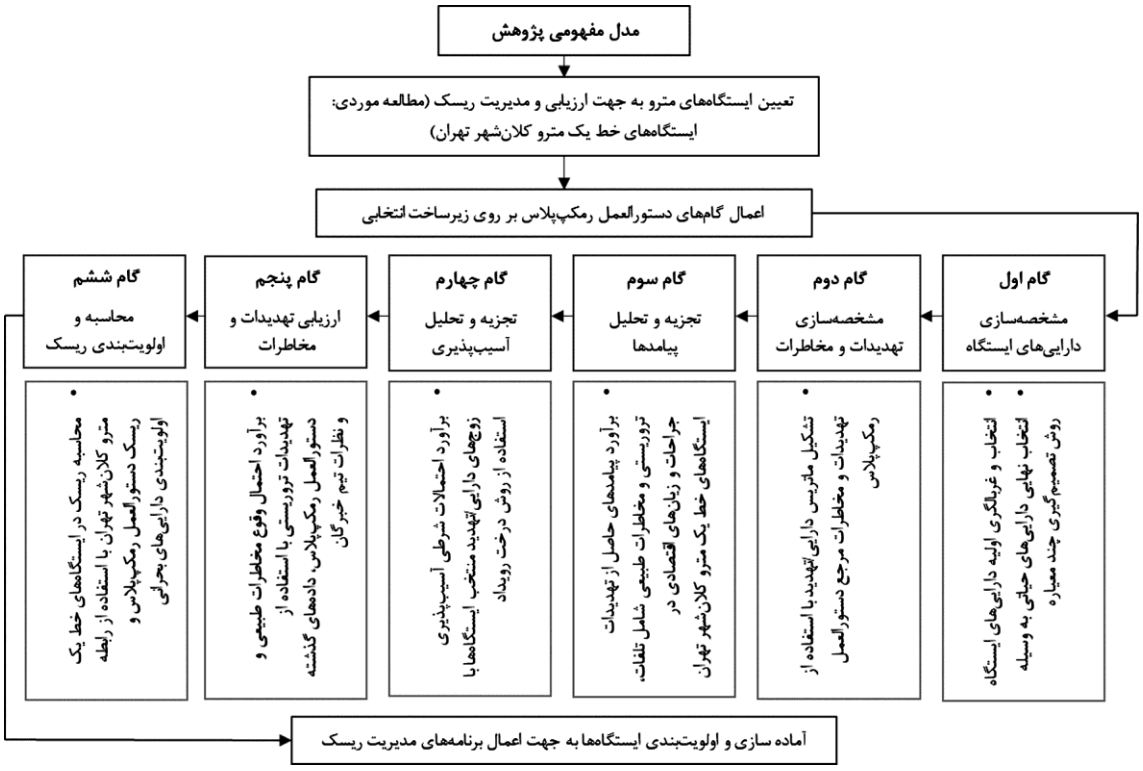
(*Multi-Attribute Decision Making Method: Simple Additive Weighting*)، با کمک تیم خبرگان ارزیابی جدول ۱، دارایی‌ها به‌منظور بررسی بیشتر مشخص شدند.

گام دوم از فرآیند رمکپ‌پلاس که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، به تعیین تهدیدات مؤثر بر دارایی‌های ایستگاه‌ها اختصاص می‌یابد، جایی که با استفاده از تهدیدات مرجع ارائه شده در این دستورالعمل، ماتریس دارایی/تهدید ساخته شده و برای ارزیابی پیامدها به گام سوم منتقل می‌شود.

گام دوم از فرآیند رمکپ‌پلاس که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت، به تعیین تهدیدات مؤثر بر دارایی‌های ایستگاه‌ها اختصاص می‌یابد، جایی که با استفاده از تهدیدات مرجع ارائه شده در این دستورالعمل، ماتریس دارایی/تهدید ساخته شده و برای ارزیابی پیامدها به گام سوم منتقل می‌شود.

در گام سوم، تجزیه‌وتحلیل پیامدهای محتمل و معقول در ایستگاه‌ها، با فرض وجود ظرفیت حداکثری جمعیت در ایستگاه، انجام می‌شود. برای محاسبه آسیب‌های جسمی و تلفات انسانی و نیز ضرر و زیان‌های مالی از شبیه‌سازی اثرات فرافشار (*Overpressure*) ایجاد انفجار بر تمامی دارایی‌های موجود در بخش‌های مختلف ایستگاه‌ها، شامل سالن فروش بلیط، سکو، تونل‌ها و سایر بخش‌ها به تفکیک برآورد شد. برای محاسبه برخی از پیامدهایی که تعیین آنها به‌صورت برآورد کمّی دقیق امکان‌پذیر نبود با استفاده از نظرات تیم ارزیابی جدول ۱ و روش دستورالعمل رمکپ‌پلاس برآوردها به‌صورت تقریب نزدیک به واقعیت صورت پذیرفت (*ASME-ITI, 2009*).

در گام چهارم این پژوهش، با استفاده از روش درخت رویداد، آسیب‌پذیری زوج‌های دارایی/تهدید، با محاسبه مجموع احتمالات هر شاخه، برآورد شد. برخی از مقادیر آسیب‌پذیری با استفاده از مقادیر محاسبه شده در مقاله (*Jalali, et al., 2014*) اعتبارسنجی و برخی دیگر به‌صورت مستقیم وارد فرآیند ارزیابی ریسک و خطرپذیری شدند.



شکل ۱- مدل مفهومی ارزیابی ریسک ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران (منابع: نویسندگان، (ASME-ITI, 2009)).

گام پنجم در این پژوهش به ارزیابی تهدیدات انسان‌ساخت و مخاطرات طبیعی پرداخت. این مرحله نیز با گردآوری تمامی وقایع تروریستی مربوط در ایران و به‌طور دقیق‌تر در کلان‌شهر تهران در حدود ۵۰ سال گذشته و استفاده از روش ارائه شده در این دستورالعمل انجام شد. برای مخاطرات طبیعی نیز که برخلاف تهدیدات تروریستی قابلیت محاسبه احتمال وقوع دارند، مقادیر احتمالاتی برای دو رویداد سیل و زلزله محاسبه شد.

گام ششم در این پژوهش به محاسبه و ارزیابی مقادیر کمی ریسک زوج‌های دارایی/تهدید ایستگاه‌های مترو اختصاص یافته و ریسک‌ها در گام هفتم، به جهت اعمال پیشنهادهای ارائه شده برای کاهش و یا از بین بردن ریسک‌های شناسایی شده، اولویت‌بندی شده می‌تواند مورد استفاده برای مدیران، شرکت‌های بهره‌بردار و سایر ارگان‌های مسئول قرار گیرد.

۲-۴- روایی و پایایی

صحت و روایی اطلاعات در تمامی بخش‌های فرآیند ارزیابی ریسک به تأیید تیم خبرگان ارزیابی رسیده است. نرخ ناسازگاری برای روش استفاده شده در گام اول کوچک‌تر از ۰/۱ می‌باشد، در نتیجه سازگاری مقایسه‌ها به جهت انتخاب دارایی‌های حیاتی قابل قبول است.

۵- بحث و بررسی

۵-۱- محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی این تحقیق کلان‌شهر تهران و به‌طور خاص خط یک متروی تهران به‌عنوان یک زیرساخت منتخب که می‌تواند نتایج آن را به سایر ایستگاه‌ها تسری داد، می‌باشد.

۵-۲- ارزیابی ریسک ایستگاه‌ها

نتایج در این قسمت از پژوهش به‌صورت گزیده‌ای از جداول شش گام محاسباتی دستورالعمل رمکپ‌پلاس ارائه شده است و نتایج حاصل از گام ششم در این پژوهش می‌تواند راهنمای مسیر مدیریت بحران و پدافند غیرعامل قرار گیرد.

۵-۲-۱- گام اول- مشخصه‌سازی دارایی‌ها

در پژوهش حاضر بیش از ۲۳۰ دارایی منحصربه‌فرد از ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران فهرست شد. با استفاده از معیارهای جدول ۲ و استفاده از یک شاخص پنج سطحی به‌منظور تعیین اهمیت دارایی‌ها فهرست نهایی دارایی‌های حیاتی موجود در ایستگاه‌ها تعیین گشت.

جدول ۲- اوزان معیارهای انتخابی (منبع: نویسندگان).

ردیف	معیار	وزن معیار
۱	مشخصه‌های حفاظتی و لایه‌های امنیتی	۰/۵
۲	خسارت‌های مالی و جانی	۰/۳۵
۳	زیرساخت‌ها و وابستگی‌های دارایی‌های ایستگاه‌ها	۰/۱۵
	مجموع	۱

در نهایت تیم ارزیابی با در اختیار داشتن اطلاعات و دانش کافی و با استفاده از روش‌های نامبرده در قسمت روش‌شناسی، دارایی‌های حیاتی ایستگاه‌ها را فهرست نمودند. جدول ۳ فهرستی از بخش‌ها و زیربخش‌های ایستگاه‌ها را نمایش می‌دهد. از نمایش دارایی‌ها در سطح قسمت‌های زیربخش‌ها اجتناب شده است.

جدول ۳- فهرست بخش‌ها و زیربخش‌های ایستگاه‌ها (منبع: نویسندگان).

ردیف	بخش های ایستگاه	زیربخش‌های ایستگاه
۱	بخش یک: سازه و تجهیزات ایستگاه	مؤلفه‌های سکوها
۲		مؤلفه‌های ورودی‌ها و خروجی‌ها
۳		سرویس‌های بهداشتی (خارج از ساختمان) و نمازخانه
۴		مؤلفه‌های قسمت‌های انتظار
۵		فضای تجاری داخل مجموعه

ادامه جدول ۳- فهرست بخش‌ها و زیربخش‌های ایستگاه‌ها (منبع: نویسندگان).

ردیف	بخش های ایستگاه	زیربخش‌های ایستگاه
۶	بخش دو: سیستم تونل و مسیر ایستگاه	مؤلفه‌های ریل
۷		مؤلفه‌های سیستم تأمین نیرو
۸		مؤلفه‌های سیستم سیگنالینگ (کنار خط و داخل کابین هدایت)
۹		اجزای ارتباطی قطارها
۱۰	بخش سه: قطارها	مؤلفه‌های واگن‌های مترو
۱۱		اجزای وسایل نقلیه تعمیر و نگهداری
۱۲	بخش چهار : سیستم‌های کنترلی و ارتباطی	مؤلفه‌های رادیوها
۱۳		مؤلفه‌های تلفن‌ها
۱۴		مؤلفه‌های شبکه‌های کامپیوتری
		مؤلفه‌های دوربین‌های امنیتی
۱۵		مؤلفه‌های سیستم راهنمایی و آدرس‌دهی عمومی
۱۶	بخش پنج : تجهیزات مکانیکی و الکتریکی	مؤلفه‌های پست فشار قوی و شبکه‌های توزیع
۱۷		مؤلفه‌های آسانسورها
۱۸		مؤلفه‌های پله و پله‌برقی
۱۹		مؤلفه‌های سیستم‌های تهویه
۲۰		مؤلفه‌های سیستم روشنایی
۲۱		مؤلفه‌های پمپ‌ها
۲۲	بخش شش: تأسیسات و زیرساخت‌های ایستگاه‌ها	مؤلفه‌های ذخایر تأمین آب
۲۳		مؤلفه‌های سیستم فاضلاب
۲۴		مؤلفه‌های فیزیکی سیستم‌های تهویه
۲۵		مؤلفه‌های سیستم‌های حفاظت در برابر آتش (بی آ اس)
۲۶		مؤلفه‌های ژنراتورهای اضطراری
۲۷		مؤلفه‌های پایانه و تعمیرگاه‌ها

۵-۲-۲- گام دوم - مشخصه‌سازی تهدیدات و مخاطرات

فهرست تهدیدات تروریستی اعم از فیزیکی و سایبری و مخاطرات طبیعی از جدول تهدیدات و مخاطرات مرجع دستورالعمل رمکپ‌پلاس، با نظرات تیم ارزیابی گزینش شده‌اند. در انتهای این گام ماتریس دارایی/تهدید تشکیل می‌شود. تهدیدات مرجع ارائه شده در دستورالعمل رمکپ‌پلاس توسط جلسات فراوان وزارت امنیت داخلی ایالات‌متحده انتخاب گشته و استفاده از این تهدیدات در دیگر زیرساخت‌ها می‌تواند به مقایسه مستقیم بین دارایی‌های زیرساخت‌ها کمک بیشتری نماید (*ASME-ITI, 2009*). در نتیجه از فواید آن که قبلاً به برخی از آنها اشاره شد، بهره بیشتری می‌توان گرفت. جدول و ماتریس نهایی دارایی/تهدید در گام ششم و در جدول ۹ آورده شده است.

۵-۲-۳- گام سوم - تجزیه‌وتحلیل پیامدها

مرحله‌ی تجزیه‌وتحلیل پیامدها در فرآیند محاسبه ریسک بسیار حیاتی می‌باشد و بررسی طراحی و چیدمان دارایی‌های ایستگاه‌ها اهمیت بسزایی در شناسایی و پیش‌بینی بدترین پیامدها نهفته یا همان «بدترین حالت معقول» و اقدامات مختلف برای ایجاد امنیت و اطمینان محیطی دارد. این

مرحله می‌تواند به ارزیاب کمک کند تا به‌راحتی پیامدهای بالقوه را در نظر بگیرد و اقدامات مناسبی را برای پیشگیری یا مدیریت آنها پیشنهاد دهد. در این پژوهش بدترین پیامدهای منطقی که ممکن است توسط هر زوج دارایی/تهدید خاص ایجاد شوند شامل «تلفات جانی»، «آسیب‌های جدی جسمانی» و «اثرات اقتصادی بر ایستگاه و بهره‌بردار» می‌باشد. شیوه محاسبه پیامدها در این پژوهش به دو صورت می‌باشد:

۱. محاسبه تلفات و آسیب‌های جانی با استفاده از روابط مهندسی، جداول آیین‌نامه‌ها و ویژگی‌های هندسی محیط.
۲. استفاده از یکسری بازه‌های از پیش تعیین شده با تأیید نظرات تیم ارزیابی.

برآورد خسارت‌های ناشی از زلزله و سیل با این منطق صورت می‌گیرد که:

۱. فرض می‌شود که تنها رخدادهایی که از زلزله و سیل مبنای طرح تجاوز می‌کنند، منجر به آسیب در سازه ایستگاه می‌شوند؛
۲. فرض می‌شود که هر چه تفاوت بین زلزله و سیل مبنای طرح و رویداد واقعی بیشتر باشد، آسیب مورد انتظار بیشتر خواهد بود؛
۳. برآورد ریسک، بر اساس میزانی که بزرگی رویداد آغازگر از مبنای طراحی دارایی تجاوز می‌کند محاسبه می‌شود؛ و
۴. مجموع ریسک خطر طبیعی همچون زلزله با جمع کردن ریسک‌ها در تمام رویدادهای آغازگر محاسبه می‌شود.

در مقاله (*Dries, et al., 2009*) میزان فاصله‌ای که مقدار معینی تی ان تی می‌تواند باعث جرح جدی و یا تلفات شود ارائه شده است. وزن مواد منفجره قابل حمل توسط مهاجمین و یا جاسازی شده در وسیله نقلیه مستقر در محیط ورودی‌های ایستگاه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همچنین مقادیر فرافشار ایجاد شده در محیط‌های بسته با استفاده از رابطه ویبول (*Weibull's Formula*) به شرح زیر محاسبه شده و در جدول ۴ به نمایش درآمده است (*Weibull, 1996*). مقادیر حجمی بخش‌های ایستگاه‌ها شامل انواع تونل‌های ورودی، سالن فروش بلیط، سکوها و رمپ‌های پله و پله‌برقی با استفاده از نقشه‌های یک ایستگاه و با فرض یک شکل بودن قسمت‌های اصلی در ایستگاه‌ها محاسبه شده و در جدول ۴ به نمایش درآمده است. در نهایت با ترکیب مقادیر فوق و محاسبه حداکثر جمعیت معقولی که در ساعات اوج ترافیک جمعیتی می‌توانند در بخش‌های مختلف یک ایستگاه حضور داشته باشند، مقادیر کمی پیامدها محاسبه می‌شود. برای محاسبه تراکم جمعیتی از ضوابط طراحی ایستگاه‌های متروی قطار شهری و حومه (جلد اول - ضوابط معماری) بهره گرفته شده است (*Sazman Barname va Boudje, 2021*). برای پیامدهای مالی نیز از اسناد و مصاحبه با قسمت‌های مرتبط با هزینه‌های ایستگاه‌های مترو استفاده شده و در جدول یکپارچه ۹ به نمایش درآمده است

جدول ۴- فرافشار ایجاد شده در فضاهای مختلف ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان).

بخش ایستگاه	حجم (متر مکعب)	فرافشار ایجاد شده (بار)			
		۶۰ پوند (۲۷ کیلوگرم)	۱۲۰ پوند (۵۴ کیلوگرم)	۲۴۰ پوند (۱۰۸ کیلوگرم)	۴۸۰ پوند (۲۱۷ کیلوگرم)
تونل ورودی تیپ یک (هر ۱۰ متر طول)	۲۳۰,۲	۴,۸۴	۷,۹۷	۱۳,۱۲	۲۱,۶۲
تونل ورودی تیپ دو (هر ۱۰ متر طول)	۱۴۰,۷	۶,۸۹	۱۱,۳۶	۱۸,۷۱	۳۰,۸۱
تونل ورودی تیپ سه (هر ۱۰ متر طول)	۱۱۰,۸	۸,۱۹	۱۳,۴۹	۲۲,۲۲	۳۶,۵۹
سالن فروش بلیط (تیپ)	۲۰۰۰	۱,۰۲	۱,۶۸	۲,۷۷	۴,۵۶
بخش سکوها (بدون حضور قطار)	۳۰۰۰۰	۰,۱۵	۰,۲۴	۰,۳۹	۰,۶۵
بخش زیر سکو (هر طرف)	۲۰۱۱	۱,۰۲	۱,۶۷	۲,۷۶	۴,۵۴
رمپ پله‌برقی به همراه پله‌برقی (یک ریل تنها)	۷۲۰	۲,۱۳	۳,۵۱	۵,۷۷	۹,۵۱
رمپ پله به همراه پله (یک شمشیری)	۸۵	۹,۹۱	۱۶,۳۲	۲۶,۸۹	۴۴,۲۹

برای محاسبه پیامدهای عمدتاً مالی ناشی از سیل و زلزله از جداول آیین‌نامه‌ای از دستورالعمل رمکپ‌پلاس به‌گونه‌ای استفاده شده است تا تطبیق‌پذیری کاملی با سازه‌های ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران داشته باشد (*ASME-ITI, 2009*). با توجه به سال ساخت اکثر ایستگاه‌ها که به سال ۱۳۸۰ برگشته و از آیین‌نامه‌های مربوط به آن سال برای ساخت بهره برده است، برخی از ضوابط ضروری طراحی در برابر زلزله که از سال ۱۳۶۶ در دنیا الزامی محسوب می‌شد استفاده نموده است. برای سیل نیز با توجه به شرایط حساس دارایی‌های الکتریکی و مکانیکی آسیب‌پذیر در ایستگاه‌ها، مقادیر آسیب با توجه به جدول نهایی ارزیابی ریسک، شماره ۹، کامل در نظر گرفته شده است.

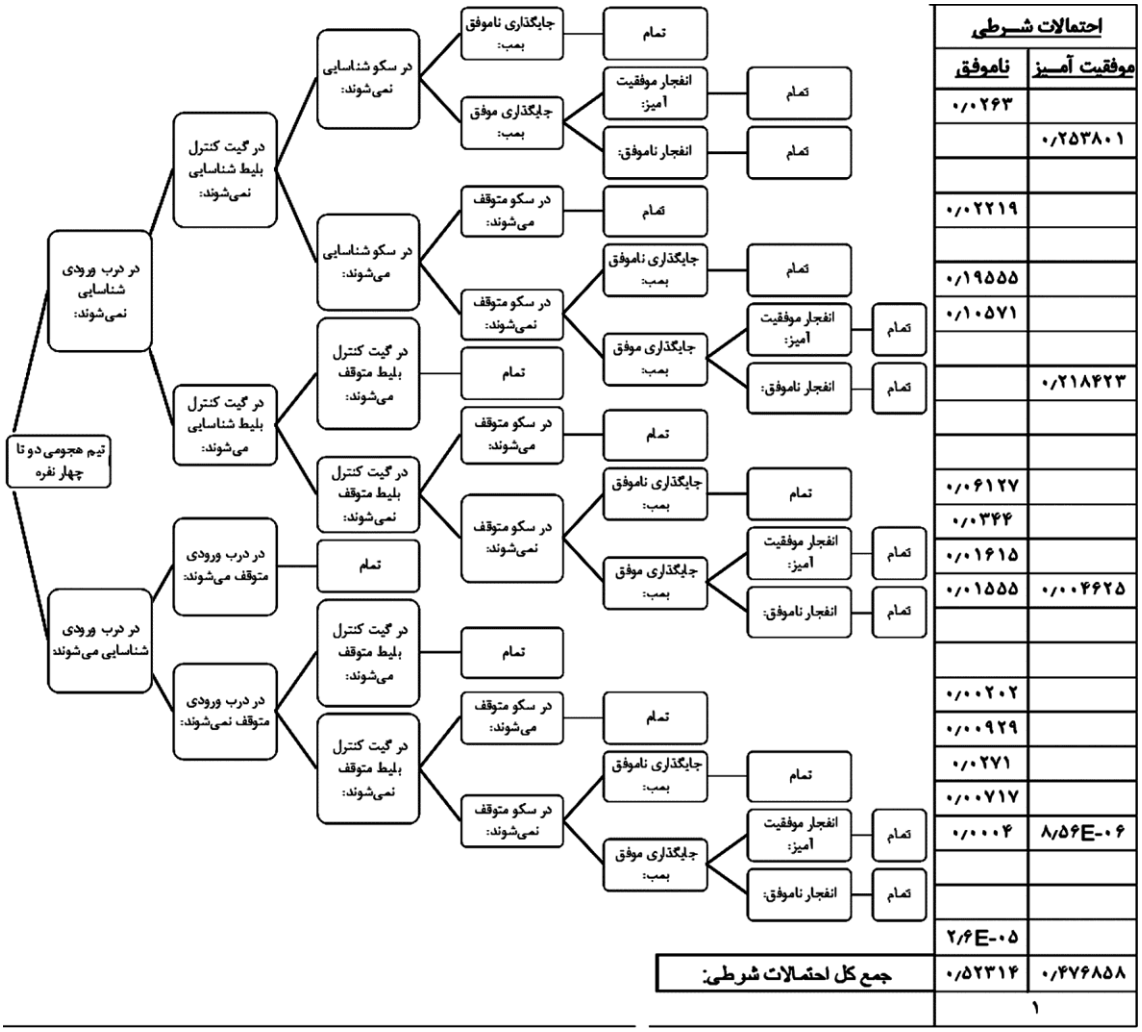
۵-۲-۴- گام چهارم- تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری

در این پژوهش، برای تجزیه‌وتحلیل آسیب‌پذیری از روش درخت رویداد استفاده شد. برای هر یک از زوج‌های دارایی/تهدید سناریویی از نحوه حمله تیم‌های هجومی (تروریستی) و خرابکاری نوشته شد و تیم ارزیابی متشکل از ۱۸ نفر از ۲۲ نفر جدول ۱ نظرات خود را برای هر شاخه از این درخت‌ها اعلام نمودند. به‌عنوان‌مثال نمودار شکل ۲، برآورد آسیب‌پذیری حمله یک تیم تروریستی ۲ تا ۴ نفره به سکوی ایستگاه و انجام عملیات بمب‌گذاری را نشان می‌دهد. همچنین سناریوی نوشته شده برای این درخت به‌صورت زیر می‌باشد:

تیم هجومی دو تا چهار نفره با تجهیزاتی کامل (ذکر شده در دستورالعمل رمکپ‌پلاس) وارد ایستگاه می‌شوند. این تیم تروریستی آگاه و خبره محسوب شده و با جزئیات ایستگاه هدف کاملاً آشنا می‌باشد. از لحاظ حمل تجهیزات، خرج‌های انفجاری را درون یک کوله معمولی به داخل ایستگاه حمل می‌کنند. با وجود دوربین‌های مدار بسته نظارتی در مقابل درب ورودی هر ایستگاه و همچنین استقرار نیروی انتظامی در مقابل درب ایستگاه که البته این مورد به‌ندرت در مقابل درب ورودی ایستگاه‌ها مشاهده می‌شوند، احتمال شناسایی این تیم بسیار پایین است.

هنگام عبور این تیم تروریستی از باجه بلیط فروشی، در صورت مشکوک ظاهر نشدن هیچ‌یک از اعضاء، مأمور کنترل بلیط نیز به آنها مشکوک نخواهد شد چراکه روزانه تعداد بسیار زیادی مسافر با کوله با مترو سفرهای خود را تکمیل می‌کنند. به‌صورت معمول، در ایستگاه‌های شلوغ‌تر همچون ایستگاه میدان امام خمینی (ره) دو مأمور انتظامی و در ایستگاه‌های خلوت‌تر همچون ایستگاه صدر یک مأمور انتظامی در سالن انتظار و در محوطه باجه‌های کنترل بلیط کشیک می‌دهند. با احتمالی بیشتر نسبت به درب ورودی اما همچنان کم، تیم هجومی موفق به رسیدن به محوطه سکو می‌شود. درصورتی‌که هدف تیم تروریستی محوطه سالن فروش و کنترل بلیط باشد، نیروی انتظامی و دیگر سیستم‌های نظارتی همچون دوربین‌های مدار بسته و مأمور کنترل بلیط به‌سرعت متوجه مشکوک بودن حرکات تیم هجومی شده و به نحوی مقتضی وارد عمل می‌شوند. احتمال درگیری تیم تروریستی با عوامل نیروی انتظامی در این مرحله بسیار زیاد است.

حال که تیم تروریستی مذکور، بدون مشکل وارد محوطه سکو می‌شود، نوبت به جایگذاری بمب‌های حمل شده می‌رسد. درصورتی‌که آنها کوله‌ها را بر روی صندلی‌ها رها کنند، دوربین‌های نظارتی و واکنش مردم باعث جلب توجه مأمورین حاضر در ایستگاه خواهد شد و مأمورین در مدت‌زمان حداکثر یک دقیقه خود را با محوطه سکو می‌رسانند. احتمال شناسایی تیم تروریستی در این مکان بالاتر از مراحل قبل خواهد بود. درصورتی‌که تیم تروریستی تصمیم به نابودسازی اتاق برق و یا تونل ایستگاه را داشته باشد، نیاز دارد تا خرج‌های انفجاری را در مکانی مناسب جاسازی و نصب کند. درب‌های اتاق‌های برق، پله‌های فرار و سیستم‌های فرمان ایستگاه‌ها با یک قفل ساده مشابه شکل ۳ می‌باشد که با یک دیلم یا اهرم ساده قابل بار شدن می‌باشند. به‌صورت میانگین حدود ۱۰۰ ثانیه به طول می‌انجامد تا تیم تروریستی، خرج‌های انفجاری را در جای مناسب جاسازی کند. همچنین از آنجایی که شناسایی تیم تروریستی و مشکوک بودن آنها در سکوها بیشتر توسط مسافرین حاضر در محوطه صورت می‌گیرد، احتمال جایگذاری بمب بدون درگیری و تلفات و جراحات حداکثری مورد بحث می‌باشد، زیرا جمعیت حاضر با آگاهی محیطی‌ای که پیدا می‌کنند تا حدودی قادر به واکنش برای حفظ جان و مال خود خواهند بود. این امر در مورد موفقیت در انفجار خرج‌های انفجاری نیز صادق است.



شکل ۲- درخت رویداد تیم تروریستی دو تا چهارنفره (تیم تروریستی شماره دو)، منبع نویسندگان.

شکل ۳- قفل ساده اتاق برق ایستگاه مترو (نویسندگان).

درصورتی‌که شناسایی تیم تروریستی در هر مرحله زودتر صورت گیرد، واکنش مسافرین و نیروهای امنیتی سریع‌تر خواهد بود و احتمال به دام افتادن تیم تروریستی نیز افزایش می‌یابد. بالطبع، احتمال جایگذاری بمب‌ها به‌منظور ایجاد تلفات و جراحات کاهش یافته و دلیل منطقی برای انفجار بمب‌ها برای آن منظور نیز نیست. بررسی خرابی کل ایستگاه از اهداف رمکپ‌پلاس نیست.

درصورتی‌که تیم تروریستی در سکو نیز شناسایی نشود با احتمال بسیار بالایی قادر به جاسازی بمب‌ها خواهد شد. ازآنجایی‌که تیم‌های چند نفره و سازمان‌یافته با احتمال کمتری به‌صورت انتحاری برای ایستگاه‌های مترو عمل

می‌کنند، ترجیح آنها این است که بدون دستگیر شدن و درگیری و نیز آسیب دیدن توسط بمب‌های جاسازی شده از ایستگاه خارج شده و با اتومبیل خود از صحنه متواری شوند. حمله انتحاری برای حالتی از تهدید که تنها از یک تروریست هجومی تشکیل شده است بسیار محتمل‌تر می‌باشد و در نظر گرفته می‌شود.

احتمال آسیب‌پذیری‌های سیستم‌های الکتریکی در برابر سیل با ارتفاع طراحی مبنا برابر با ۱ در نظر گرفته شده و برای زلزله نیز از جدول ۵ که به‌صورت مستقیم از دستورالعمل رمکپ‌پلاس برگرفته شده است استفاده شد.

در نهایت، همان‌طور که برای تیم هجومی ۲ تا ۴ نفره سناریو و درخت تصمیم تشکیل شد، برای باقی تهدیدات انسان‌ساخت نیز همین امر صورت گرفت و نتیجه نهایی در جدول ۶ به نمایش درآمده است. لازم به ذکر است که برخی از موارد آسیب‌پذیری از نتایج پژوهش (*Jalali, et al., 2014*) برای بخش‌های مختلف ایستگاه بهره گرفته شده است.

۵-۲-۵- گام پنجم- ارزیابی تهدیدات و مخاطرات

برای محاسبه احتمال وقوع حملات تروریستی در ایستگاه‌های متروی خط یک کلان‌شهر تهران به شرح رمکپ‌پلاس اقدامات ذکر شده صورت گرفت:

۱. میانگین حملات تروریستی رخ داده در هر سال به‌صورت جداگانه و به‌ترتیب برای کل کشور و کلان‌شهر تهران با استفاده از داده‌های جهانی حملات تروریستی (*START, 2022*) از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰ محاسبه شد.

۲. از ۱۵ زیرساخت با اهمیت بالا، منتخب معاونت تدوین، تنقیح و انتشار قوانین و مقررات معاونت حقوقی ریاست جمهوری، هشت زیرساخت کلیدی محسوب می‌شود که حوزه حمل‌ونقل نیز زیرمجموعه آن است. همچنین فرض می‌شود که احتمال حمله به هر یک از این زیرساخت‌ها یکسان می‌باشد.

۳. فرض می‌شود که تمام ایستگاه‌های زیر مجموعه مترو در کشور، احتمالی برابر به‌منظور مورد هجوم قرار گرفتن توسط یک تیم تروریستی اعم از فیزیکی و سایبری دارند. از داده‌ها و اسناد موجود، تعداد ایستگاه‌های فعال در ایران تا ابتدای سال ۱۴۰۲، ۲۵۷ مورد می‌باشد که سهم کلان‌شهر تهران ۱۵۲ ایستگاه فعال بوده است. کل سهم حمل‌ونقل ریلی برای ایران چیزی حدود ۱۶٫۷ درصد و سهم جابه‌جایی مسافرین کلان‌شهر تهران با مترو چیزی حدود ۱۰ درصد می‌باشد (تسنیم، ۱۴۰۲). بدین‌ترتیب احتمال حمله به یکی از ایستگاه‌های مترو در بدبینانه‌ترین حالت خود، به دلیل فرض مشارکت ۱۰۰ درصدی مترو در حمل‌ونقل مسافری، محاسبه می‌شود.

جدول ۵- ضرایب آسیب‌پذیری سازه و تجهیزات (ITI, 2009)

آسیب‌پذیری	انواع تجهیزات، نصب و جای‌گیری
۰٫۲	• تجهیزات نصب شده بر روی دال‌ها - پمپ‌ها، شیرها، کمپرسورها، کنتورها، موتورهای الکتریکی، کنترل‌های الکتریکی، پیش‌آمدگی‌ها و غیره. • لوله‌کشی مدفون • آبگرمکن‌ها و تجهیزات مشابه مجهز به مهار لرزه‌ای • اتومبیل و کامیون، تجهیزات سنگین
۰٫۳	• لوله‌کشی روی زمین که با آیین‌نامه‌ها و استانداردهای پذیرفته شده مانند ANSI B31.1، ANSI B31.3 طراحی شده است. • مخازن تحت فشار طراحی شده بر اساس آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ASME
۰٫۵	• سازه‌های طراحی شده با آیین‌نامه یو بی سی و یا معادل آن
۰٫۷۵	• سازه‌هایی که بر اساس آیین‌نامه طراحی نشده‌اند
۱٫۰	• سازه‌های متحرک و کشنده‌ها

جدول ۶- میزان آسیب‌پذیری زوج زیربخش‌ها/تهدیدات ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران (منابع: نویسندگان، (Jalali, et al., 2014))

تهدیدات	زیربخش‌های ایستگاه‌ها					
	ورودی	سالن انتظار (بلیط)	تونل‌ها	سکو	سیستم‌های برقی	سیستم‌های مکانیکی
تروریست انتحاری	۰,۷۷۴	۰,۶۱۳	۰,۰۰۲	۰,۷۷۴	۰,۰۴۲	۰,۰۴۶
تیم هجومی دو	۰,۴۷۶	۰,۳۹۷	۰,۰۰۱	۰,۴۷۶	۰,۴۴۴	۰,۳۰۵
تیم هجومی سه	۰,۴۷۶	۰,۳۹۷	۰,۰۰۱	۰,۴۷۶	۰,۴۴۴	۰,۳۰۵
تیم هجومی چهار*	۰,۴۷۶	۰,۳۹۷	۰,۰۰۱	۰,۴۷۶	۰,۴۴۴	۰,۳۰۵
وسیله نقلیه یک	۰,۷۲۹	۰	۰	۰	–	–
وسیله نقلیه دو	۰,۶۱۸	۰	۰	۰	–	–
وسیله نقلیه سه	۰,۲۰۰	۰	۰,۱۰۰	۰	–	–
وسیله نقلیه چهار	۰,۰۰۲	۰	۰,۰۰۲	۰	–	–
هوایی یک	۰,۱۴۲	۰	۰	۰	–	۰
هوایی دو	۰,۱۸۲	۰	۰	۰	**	۰
خرابکاری (فیزیکی) نفوذی	۰,۰۱۸	۰,۰۴۵	۰,۰۴۱	۰,۱۱۱	۰,۴۴۴	۰,۳۰۵
خرابکاری (فیزیکی) بیگانه	۰,۰۰۹	۰,۰۲۲۵	۰,۰۲۰۵	۰,۰۵۵۵	۰,۲۲۲	۰,۱۵۲
خرابکاری (سایبری) نفوذی	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۵۶	۰,۰۰۱
خرابکاری (سایبری) بیگانه	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۲۸	۰,۰۰۱
دزدی (فیزیکی) نفوذی	۰,۰۴۲	۰,۰۳۱	۰,۰۳۷	۰,۷۷۷	۰,۰۴۲	۰,۰۴۶
دزدی (فیزیکی) بیگانه	۰,۰۲۱	۰,۰۱۵	۰,۰۱۸	۰,۳۸۸	۰,۰۲۱	۰,۰۲۳
دزدی (سایبری) نفوذی	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۳	۰,۰۰۱	۰,۰۵۶	۰,۰۰۱
دزدی (سایبری) بیگانه	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۲۸	۰,۰۰۱
آلودگی‌ها	۰,۰۲۸	۰,۰۸۷۲	۰,۶۱۱	۰,۶۱۱	۰,۰۱۶	۰,۰۴۴

* آسیب‌پذیری تیم‌های هجومی سه و چهار مشابه تیم هجومی دو می‌باشد با این تفاوت که در قسمت پیامدها، اثرات تیم‌های هجومی سه و چهار به ترتیب دو و چهار برابر تیم هجومی دو برآورد می‌شود.

** موارد (-) بستگی به در دسترس بودن تجهیزات در سطح زمین و یا در زیرزمین دارند. برای موارد غیر منطقی مقادیر ۰ در نظر گرفته شده است.

۴. از میان ۲۶ بخش جزء ایستگاه‌ها ارائه شده در جدول ۳ در گام اول ۱۹ مورد از آنها، طبق نظرات تیم ارزیابی، دارای هزینه خرابی زیاد و خیلی زیاد می‌باشند و یا دربرگیرنده تعداد زیادی از مسافرین و دیگر افراد هستند و در صورت خرابی، پیامدهای سنگینی را برجای می‌گذارند. در این صورت با فرض احتمال مساوی حمله به هر بخش جزء، عدد احتمال حمله برای هر بخش محاسبه می‌شود. در نهایت برای کلان‌شهر تهران با محاسبه سهم ۲۰ درصدی جابه‌جایی مسافرین توسط خط یک کلان‌شهر تهران، مقادیر برای این شهر مجدداً تنظیم می‌شود.

در این بخش نیز برای تخصیص درصد دقیق‌تری برای هر زیربخش می‌توان با توجه به طرح پرسشنامه در مقاله (*Jalali, et al., 2014*) بر اساس چهار شاخص شدت خسارت، توانایی دشمن، جذابیت هدف و سابقه رخداد که درصد فراوانی برخی از تهدیدات اعم از تروریستی بمب‌گذاری، خرابکاری سایبری، آلودگی و نشر مواد سمی، هوایی را ارائه نموده است، مقادیر را محاسبه نمود.

مقادیر احتمالاتی وقوع سیل با توجه به مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و همچنین آیین‌نامه فما ۱ درصد در هر سال (دوره بازگشت ۱۰۰ سال) در نظر گرفته می‌شود. در این آیین‌نامه ذکر شده است که «ارتفاع این سیلاب که

شامل ارتفاع موج ناشی از آن است، به‌عنوان سیل طرح می‌باشد.» (*Mogharart Melli Sakhteman, 2019*).

برای زلزله نیز از پژوهش (*Khoshnevis, et al., 2017*) برای محاسبه مقادیر احتمالاتی سالانه فراگذشت بر اساس مقدار حداکثر شتاب زمین (*PGA*) برای بزرگاهای مختلف زمین‌لرزه استفاده شده است. مقادیر نهایی برآورد و تخمین احتمالات حملات تروریستی و مخاطرات طبیعی شامل سیل و زلزله در جدول ۷ و ۸ آمده است.

۵-۲-۶- گام ششم- ارزیابی ریسک در ایستگاه‌های مترو

با استفاده از داده‌های گام سوم، پیامدهای حاصل از تهدیدات و مخاطرات بر روی دارایی‌های ایستگاه‌ها شامل تلفات، آسیب‌های شدید جسمی و ضرر و زیان‌های وارده به مالک و بهره‌بردار مترو برآورد شد. همچنین داده‌های گام چهارم یعنی برآورد آسیب‌پذیری حاصل از حملات تیم‌های تروریستی (فیزیکی و سایبری)، خرابکاری‌ها (فیزیکی و سایبری) و مخاطرات طبیعی بر روی دارایی‌های مختلف ایستگاه‌ها محاسبه شد. همچنین با در دست داشتن احتمال وقوع تهدیدات و مخاطرات که در گام پنجم برآورد شد به محاسبه ریسک حاصل از ضرب این سه عامل پرداخته می‌شود. برای هر زوج دارایی/تهدید سه ریسک محاسبه می‌شود، یکی برای تلفات، دیگری برای آسیب‌های شدید جسمی و در آخر برای ضرر و زیان مالک و بهره‌بردار مترو و داده‌های حاصل از این بخش به قسمت نهایی برای بررسی بیشتر فرستاده می‌شود. جدول ۹ مقادیر ریسک محاسبه شده برای زیربخش‌ها و تهدیدات متناظر نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای موجود در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر ریسک را برای بخش‌ها و تهدیدات (مخاطرات) به تصویر می‌کشد.

جدول ۷- احتمال وقوع انواع تهدیدات تروریستی و سیل برای زیربخش‌های ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان)

	احتمال وقوع (دوره بازگشت) زیربخش‌های ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران							
تهدیدات/ مخاطرات	ورودی ایستگاه	سالن انتظار	تونل‌ها	سکو	بخش‌های پایشی- امنیتی	بخش‌های خدماتی	تأسیسات برقی	تأسیسات مکانیکی
هوایی	۰,۰۰۰۰۰۴۳۵۲	۰,۰۰۰۰۰۱۵۳۶	۰,۰۰۰۰۰۲۰۴۸	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۰۰۲۸۱۶	۰,۰۰۰۰۰۳۰۷۲
دزدی فیزیکی	۰,۰۰۰۰۰۵۱۲	۰,۰۰۰۰۰۶۴	۰,۰۰۰۰۰۶۹۱۲	۰,۰۰۰۰۰۶۹۱۲	۰,۰۰۰۰۰۵۸۸۸	۰,۰۰۰۰۰۳۵۸۴	۰	۰,۰۰۰۰۰۱۵۳۶
خرابکاری فیزیکی	۰,۰۰۰۰۰۵۱۲	۰,۰۰۰۰۰۶۱۴۴	۰,۰۰۰۰۰۴۸۶۴	۰,۰۰۰۰۰۵۸۸۸	۰,۰۰۰۰۰۸۷۰۴	۰,۰۰۰۰۱۰۴۹۶	۰,۰۰۰۰۱۱۷۷۶	۰,۰۰۰۰۰۸۴۴۸
خرابکاری/ دزدی سایبری	۰	۰	۰	۰	۰,۰۰۰۰۰۴۸۶۴	۰	۰,۰۰۰۰۰۵۸۸۸	۰,۰۰۰۰۰۲۵۶
آلودگی (تمامی موارد)	۰,۰۰۰۰۰۱۷۹۲	۰,۰۰۰۰۰۳۸۴	۰,۰۰۰۰۰۴۰۹۶	۰,۰۰۰۰۰۴۶۰۸	۰,۰۰۰۰۰۲۰۴۸	۰,۰۰۰۰۰۶۹۱۲	۰	۰,۰۰۰۰۰۵۸۸۸
تروریستی- بمب‌گذاری (گروهی/ انتحاری)	۰,۰۰۰۰۰۹۲۱۶	۰,۰۰۰۰۰۷۶۸	۰,۰۰۰۰۰۷۶۸	۰,۰۰۰۰۰۸۱۹۲	۰,۰۰۰۰۰۴۰۹۶	۰,۰۰۰۰۰۴۶۰۸	۰,۰۰۰۰۰۵۱۲	۰,۰۰۰۰۰۴۰۹۶
سیل				۰,۰۱				

جدول ۸- احتمال وقوع زلزله برای مجموعه ایستگاه‌های متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان).

بزرگا (ریشتر)	۶,۵ – ۶,۰	۷,۰ – ۶,۵	۷,۵ – ۷,۰	۸,۰ – ۷,۵
زلزله (کل سازه ایستگاه)	۰,۰۰۱۸	۰,۰۰۱۱	۰,۰۰۰۳	۰,۰۰۰۱

جدول ۹- ارزیابی ریسک زیربخش‌های ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان).

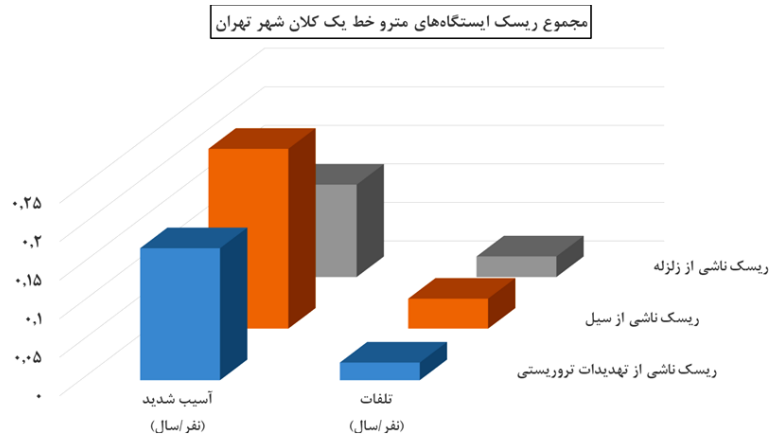
		ریسک ناشی از تهدیدات تروریستی			ریسک ناشی از سیل			ریسک ناشی از زلزله		
بخش‌های ایستگاه	زیر بخش‌های ایستگاه	آسیب شدید	تلفات	ضرر و زیان مالی	آسیب شدید	تلفات	ضرر و زیان مالی	آسیب شدید	تلفات	ضرر و زیان مالی
		نفر/سال	نفر/سال	دلار/سال	نفر/سال	نفر/سال	دلار/سال	نفر/سال	نفر/سال	دلار/سال
بخش یک – سازه و تجهیزات ایستگاه	مؤلفه‌های سکوها	۰,۰۶۵۴۴۲۲۲۴	۰,۰۲۰۲۰۳۵۲۶	۰,۷۲۵۳۶۷۰۴	۰,۰۱۵۵۵	۰,۰۱۵۵۵	۳۰۰	۰,۰۰۷۶۹۷۲۵	۰,۰۰۵۱۳۱۵	۱۹,۸
	مؤلفه‌های ورودی‌ها و خروجی‌ها	۰,۰۴۲۳۴۸۶۳۳	۰,۰۰۰۳۳۶۱۹۳	۱۷,۸۷۲۲۸۳۶۵	۰,۰۶۲۲	۰,۰۰۷۷۷۵	۱۰۵۱۰	۰,۰۰۵۱۳۱۵	۰,۰۰۲۵۶۵۷۵	۱۳۲۳,۳
	سرویس‌های بهداشتی (خارج از ساختمان) و نمازخانه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸۹,۷۵
	مؤلفه‌های قسمت‌های انتظار	۰,۰۴۶۵۱۲۱۱۴	۰,۰۰۰۲۷۸۱	۸,۴۳۷۴۲۲۰۸	۰,۰۳۱۱	۰,۰۰۷۷۷۵	۵۹۰۰	۰,۰۶۶	۰,۰۱۶۵	۹۲۰,۷
	فضای تجاری داخل مجموعه	۰,۰۱۶۹۲۷۴۹۳	۰,۰۰۲۱۲۸۵۳۷	۰,۰۳۸۶۰۴۸	۰,۱۲۴۴	۰,۰۰۷۷۷۵	۵۶۰	۰,۰۴۱۰۵۲	۰,۰۰۲۵۶۵۷۵	۴۲,۹
بخش دو – سیستم تونل و مسیر ایستگاه	مؤلفه‌های ریل	۰	۰	۲,۶۵۱۱۱۰۴	۰	۰	۱۳۰۰	۰	۰	۱۶۵
	مؤلفه‌های سیستم تأمین نیرو	۰	۰	۴,۸۱۶۴۶۰۸	۰	۰	۳۱۰۰	۰	۰	۰,۴۶۸۶
	مؤلفه‌های سیستم سیگنالینگ (کنار خط و داخل کابین هدایت)	۰	۰	۱۱۲,۰۲۹۸۳۶۸	۰	۰	۵۹۶۰۰	۰	۰	۰
	اجزا ارتباطی قطارها	۰	۰	۱۲,۶۹۲۹۹۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بخش سه – قطارها	مؤلفه‌های واگن‌های مترو	۰	۰	۳۷,۹۱۸۹۷۶	۰	۰	۷۷۰۰۰	۰	۰	۰
	اجزای وسایل نقلیه تعمیر و نگهداری	۰	۰	۲,۶۴۷۲۹۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۹- ارزیابی ریسک زیربخش‌های ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان).

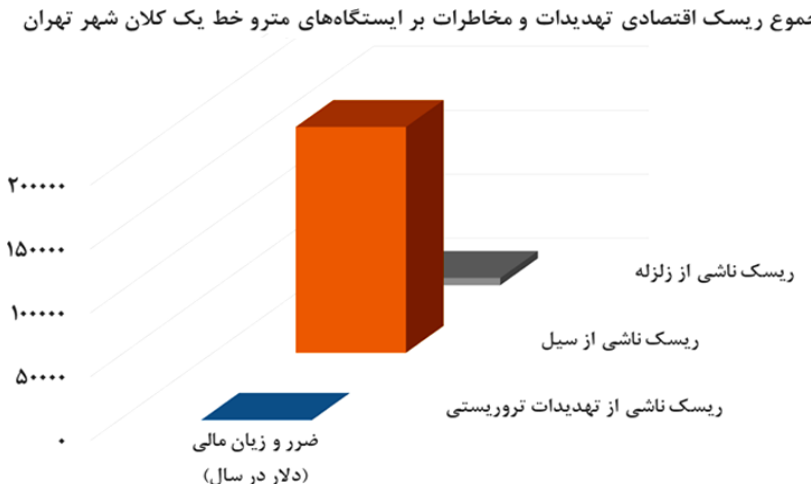
		ریسک ناشی از تهدیدات تروریستی			ریسک ناشی از سیل			ریسک ناشی از زلزله		
بخش چهار – سیستم‌های کنترلی و ارتباطی	مؤلفه‌های رادیوها	۰	۰	۰,۶۸۲۶۴۳۴۵۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	مؤلفه‌های تلفن‌ها	۰	۰	۰,۰۱۸۴۱۱۵۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	مؤلفه‌های شبکه‌های کامپیوتری	۰	۰	۱,۱۸۶۰۹۹۲	۰	۰	۵۷۰	۰	۰	۴۲,۹
	مؤلفه‌های دوربین‌های امنیتی	۰	۰	۰,۱۰۴۲۳۸۰۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	مؤلفه‌های سیستم راهنمایی و آدرس‌دهی عمومی	۰	۰	۰,۱۶۹۹۰۶۱۷۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بخش پنج – تجهیزات مکانیکی و الکتریکی	مؤلفه‌های پست فشار قوی و شبکه‌های توزیع	۰	۰	۱۷,۵۵۷۸۹۹۲۶	۰	۰	۵۴۹۰	۰	۰	۱۰۸۳,۷۲
	مؤلفه‌های آسانسورها	۰	۰	۰,۵۵۵۰۷۰۴۶۴	۰	۰	۶۳۴	۰	۰	۵۰,۸۲
	مؤلفه‌های پله و پله‌برقی	۰	۰	۰,۲۲۸۰۷۶۲۸۸	۰	۰	۴۲۱	۰	۰	۹۷,۶۸
	مؤلفه‌های سیستم‌های تهویه	۰	۰	۰,۰۸۴۴۴۴۷۸۷	۰	۰	۷۲۳,۷	۰	۰	۰
	مؤلفه‌های سیستم روشنایی	۰	۰	۰,۰۳۳۴۸۳۱۶۲	۰	۰	۲۹,۵	۰	۰	۰
	مؤلفه‌های پمپ‌ها	۰	۰	۰,۲۰۶۴۴۴۰۳۲	۰	۰	۳۰۷,۹۶	۰	۰	۰
بخش شش – تأسیسات و زیرساخت‌های ایستگاه‌ها	مؤلفه‌های ذخائر تأمین آب	۰	۰	۱,۶۳۱۵۰۶۴۳۲	۰	۰	۲۱۵۰	۰	۰	۵۹۸,۶۲
	مؤلفه‌های سیستم فاضلاب	۰	۰	۹,۴۲۳۳۶۸۱۹۲	۰	۰	۷۲۸۵	۰	۰	۹۵۲,۰۵
	مؤلفه‌های فیزیکی سیستم‌های تهویه	۰	۰	۰,۵۲۳ص ۳۵۳۸۵۶	۰	۰	۲۸۰	۰	۰	۳۷,۶۲

جدول ۹- ارزیابی ریسک زیربخش‌های ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران (منبع: نویسندگان).

	ریسک ناشی از تهدیدات تروریستی			ریسک ناشی از سیل			ریسک ناشی از زلزله		
مؤلفه‌های سیستم‌های حفاظت در برابر آتش (بی آ اس)	۰	۰	۲,۸۳۸۵۷۶۶۴۶	۰	۰	۵۶۳,۹۵	۰	۰	۱۸۲,۸۲
مؤلفه‌های ژنراتورهای اضطراری	۰	۰	۰,۱۳۰۶۴۰۱۲۸	۰	۰	۱۲۰	۰	۰	۰
مؤلفه‌های پایانه و تعمیرگاه‌ها	۰	۰	۱۴۴,۸۰۲۴۱۹۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ریسک کل	۰,۱۷۱۲۳۰۴۶۵	۰,۰۲۲۹۴۶۳۵۷	۳۸۰,۰۰۶۹۳۰۵	۰,۲۳۳۲۵	۰,۰۳۸۸۷۵	۱۷۶۸۴۵,۱۱	۰,۱۱۹۸۸۰۷۵	۰,۰۲۶۷۶۳	۵۷۰۸,۱۴۸۶



شکل ۴- میزان تلفات و آسیب شدید جسمی ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران در یک سال (منبع: نویسندگان).



شکل ۵- ضرر و زیان مالی ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران در یک سال (منبع: نویسندگان)

۵-۲-۶- گام ششم- ارزیابی ریسک در ایستگاه‌های مترو

با استفاده از داده‌های گام سوم، پیامدهای حاصل از تهدیدات و مخاطرات بر روی دارایی‌های ایستگاه‌ها شامل تلفات، آسیب‌های شدید جسمی و ضرر و زیان‌های وارده به مالک و بهره‌بردار مترو برآورد شد. همچنین داده‌های گام چهارم یعنی برآورد آسیب‌پذیری حاصل از حملات تیم‌های تروریستی (فیزیکی و سایبری)، خرابکاری‌ها (فیزیکی و سایبری) و مخاطرات طبیعی بر روی دارایی‌های مختلف ایستگاه‌ها محاسبه شد. همچنین با در دست داشتن احتمال وقوع تهدیدات و مخاطرات که در گام پنجم برآورد شد به محاسبه ریسک حاصل از ضرب این سه عامل پرداخته می‌شود. برای هر زوج دارایی/تهدید سه ریسک محاسبه می‌شود، یکی برای تلفات، دیگری برای آسیب‌های شدید جسمی و در آخر برای ضرر و زیان مالک و بهره‌بردار مترو و داده‌های حاصل از این بخش به قسمت نهایی برای بررسی بیشتر فرستاده می‌شود. جدول ۹ مقادیر ریسک محاسبه شده برای زیربخش‌ها و تهدیدات متناظر نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای موجود در شکل‌های ۴ تا ۶، مقادیر ریسک را برای بخش‌ها و تهدیدات (مخاطرات) به تصویر می‌کشد.

۶- نوآوری تحقیق

یکی از روش‌های ارزیابی زیرساخت‌های حساس و حیاتی بهره‌گیری از مدیریت ریسک و ارزیابی میزان تهدیدها و پیامدهای آن با استفاده از تکنیک‌های رمکپ است که به‌نوبه خود یک کار نو و بدیع در حوزه پدافند غیرعامل و مدیریت ریسک می‌باشد. آنچه این تحقیق را از سایر تحقیق‌های مشابه متمایز می‌سازد بهره‌گیری از تکنیک بازنگری شده و بروز شده رمکپ با عنوان رمکپ‌پلاس است که شیوه‌ای نوین در به‌کارگیری آن برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی به‌ویژه مراکز جمعیتی انبوه همانند متروی تهران است. همچنین این پژوهش از لحاظ جامعیت دارایی‌های لحاظ شده در ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران و جامعیت تهدیدات و مخاطرات در نظر گرفته شده، به‌نحوی‌که پاسخگوی اکثر رویدادهای به وقوع پیوسته باشد، پیشتاز می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های پژوهش حاضر، برخی از دارایی‌های موجود در ایستگاه‌های خط یک متروی کلان‌شهر تهران آسیب‌پذیر بوده و میزان ریسک و خطرپذیری غیرقابل قبولی را تجربه می‌کنند. وقوع یک تهدید انسان‌ساخت و یا یک رویداد طبیعی از مجموعه تهدیدات و مخاطرات ارائه شده در این پژوهش می‌تواند پیامدهای سنگین و یا غیرقابل جبرانی را از خود به‌جای بگذارد. این پیامدها می‌تواند ضرر و زیان‌های سنگین مالی، آسیب‌های شدید جسمانی افراد حاضر در ایستگاه‌ها و همچنین تلفات و از دست رفتن جان مسافرین و کارکنان باشد. همان‌طور که در انتهای گام ششم از فرآیند رمکپ‌پلاس مشخص شد، بالاترین میزان ریسک برای دارایی‌های فیزیکی و سایبری، برخی از مؤلفه‌های سیستم سیگنالینگ، برخی از مؤلفه‌های واگن‌های قطارها، اتاق کنترل در بخش قسمت انتظار، پله‌های برقی در مؤلفه‌های ورودی ایستگاه‌ها، سامانه پست فشار قوی اختصاصی از شبکه توزیع و سیستم هدایت آب ایستگاه‌ها بودند. برای سرمایه‌های انسانی نیز در بخش سکو مسافرین و کارکنان، برای ورودی‌های ایستگاه‌ها مسافرین و رهگذران محیط ورودی ایستگاه، در قسمت انتظار نیز مسافرین و کارکنان سالن فروش بلیط و در فضاهای تجاری ایستگاه‌ها فروشندگان، تأمین‌کنندگان، مسافرین و دیگر افراد شاغل مشمول خطرپذیرترین دارایی‌ها می‌شوند.

همچنین مهم‌ترین تهدیدات و مخاطراتی که در صدر جدول پرتکرارترین و حادثه‌آفرین‌ترین‌ها بودند به‌ترتیب شامل تروریست‌ها (اعم از انتحاری و بمب‌گذاری گروهی)، وسایل نقلیه هجومی در محیط ورودی ایستگاه‌ها، خرابکاری‌های فیزیکی و سایبری، آلودگی‌ها و دزدی سایبری (سرقت اطلاعات و...) برای بخش تهدیدات تروریستی و سیل و زلزله برای بخش مخاطرات طبیعی می‌شوند.

۸- تقدیر و تشکر

از تمامی متخصصین و افرادی که ما را در این پژوهش یاری فرمودند، به‌ویژه جناب آقای مهندس سید محمد جذبی از تیم کنترل پروژه شرکت مهندسی بلندپایه صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

۶- مراجع

[1] Brashear, J., Olstein, M., Binning, D., & Stenzler, J. (2007). RAMCAP™: Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection for the Water and Wastewate Sector. Proceedings of the Water Environment Federation, 2007, 2199-2212. doi:10.217519386470778811617 6.

[2] Chen, T. Y.-J., Washington, V. N., Aven, T., & Guikema, S. D. (2020). Review and Evaluation of the J100-10 Risk and Resilience Management Standard for Water and Wastewater Systems. Risk Analysis, 40(3), 608-623. doi:https://doi.org/10.1111/risa.13421

[3] David J. Dries, M., MD, FCCM, David Bracco, M., EDIC, FCCM, Tarek Razek, M., Norma Smalls-Mantey, M., FACS, FCCM, & Dennis Amundson, D., MS, FCCM. (2009). Conventional Explosions and Blast Injuries. Fundamental Disaster Management.

[4] ITI, A. (2009). All-hazards Risk and Resilience: Prioritizing Critical Infrastructure Using the RAMCAP Plus Approach: ASME, Three Park Avenue, New York, ISBN: 978-0-7918-0287-8, www.asme.org

[5] Khoshnevis, N., Taborda, R., Azizzadeh-Roodpish, S., & Cramer, C. (2017). Seismic hazard estimation of northern Iran using smoothed seismicity. Journal of Seismology, 21. doi:10.1007/s10950-017-9645-5.

[6] Li, P., Chen, X., Ma, C., Zhu, C., & Lu, W. (2022). Risk assessment of COVID-19 infection for subway commuters integrating dynamic changes in passenger numbers. Environmental Science and Pollution Research, 29(49), 74715-74724. doi:10.1007/s11356-022-20920-9.

[7] Pursiainen, C. (2018). Critical infrastructure resilience: A Nordic model in the making? International Journal of Disaster Risk Reduction, 27, 632-641. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.08.006.

[8] Robert, O.-K., Tam, V., Ma, M., & Mashiri, F. (2021). Critical review of the Threats affecting the building of Critical Infrastructure Resilience. International Journal of Disaster Risk Reduction, 60. doi:10.1016/j.ijdrr.2021.102316.

[9] START (2022). National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism. Global Terrorism Database 1970 - 2020 [data file]. https://www.start.umd.edu/gtd.

[10] Wang, G., Liu, Y., Hu, Z., Zhang, G., Liu, J., Lyu, Y., Liu, L. (2021). Flood Risk Assessment of Subway Systems in Metropolitan Areas under Land Subsidence Scenario: A Case Study of Beijing. Remote Sensing, 13(4), 637. https://www.mdpi.com/2072-4292/13/4/637.

[11] Wang, Z., & Liu, X. (2022). Cyber security of railway cyber-physical system (CPS) – A risk management methodology. Communications in Transportation Research, 2, 100078. doi:https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100078.

[12] Weibull, H. R. W. (1996). Pressures Recorded In Partially Closed Chambers At Explosion Of Tnt Charges. Annals of the New York Academy of Sciences, 152(1), 357-361. doi:https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1968.tb11987.x.

[13] Yan, Q. S. (2018). Damage Assessment of Subway Station Columns Subjected to Blast Loadings. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 18(03), 1850034. doi:10.1142/s0219455418500347

[14] Yu, H., Wang, Y., Qiu, P., & Chen, J. (2019). Analysis of natural and man-made accidents happened

in subway stations and trains: based on statistics of accident cases. MATEC Web Conf., 272, 01031. https://doi.org/10.1051/matecconf/201927201031.

[۱۵] سازمان برنامه‌وبودجه، ج. ا. ا. (۱۴۰۰). ضوابط طراحی ایستگاه‌های قطار شهری و حومه (جلد اول-ضوابط معماری). (1400/422775): سازمان برنامه‌وبودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی.

[۱۶] خبرگزاری تسنیم (۱۴۰۲). گزارش شهردار تهران از سهم حمل‌ونقل عمومی. خبرگزاری تسنیم. https://tn.ai/2887199.

[۱۷] جلالی فراهانی، غ. ر. شمسایی زفرقندی، ف. ا. غضنفری، م. و قنبری‌نسب، ع. (۲۰۱۴). تعیین و رتبه‌بندی تهدیدات انسان‌ساخت عمدی در اجزای اصلی ایستگاه‌های مترو. مدیریت بحران، ۲(۲)، ۶۵-۷۵. http://www.joem.ir/article_5605_ffeca55765f389d17406f057ab6fbe48.pdf.

[۱۸] زرقانی، سید هادی و نسیمی (۲۰۲۱). بیوتروریسم و تهدید عناصر زیرساخت حمل‌ونقل شهری. اولین کنفرانس ملی جغرافیا و مخاطرات محیطی.

[۱۹] مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۸). مبحث ۶- بارهای وارد به ساختمان. In بار سیل (.Vol. 0- 978-600-301-013 pp 37-43): نشر توسعه ایران.

[۲۰] شیعه، ا.، حبیبی، ک. و احسانی، م. (۲۰۲۰). ارزیابی میزان خطرپذیری ایستگاه‌های مترو شهر تهران هنگام وقوع زمین‌لرزه با رویکرد کاهش آسیب‌پذیری کالبدی از طریق مدیریت هوشمند شهری (مطالعه موردی ایستگاه‌های تجریش، دروازه شمیران و نواب). معماری و شهرسازی ایران(JIAU), 11(1), 209-229. doi:10.30475/isau.2020.131744.0.

[۲۱] قادری، س. رحیمی، آ.، هدایتی‌فر، م. و عرب نجفی، س. (۱۳۹۴). ارزیابی و مدیریت ریسک محیط زیستی مترو تهران و حومه با استفاده از روش EFMEA (مطالعه موردی: پایانه صادقیه). علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۷(۲ (مسلسل ۶۵))، ۰. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=249917.

[۲۲] قنادی تقی زاده، ز. و باقری، ح. (۲۰۲۱). بررسی میزان آسیب‌پذیری ایستگاه‌های مترو در برابر تهدیدات تروریستی شیمیایی مطالعه موردی: ایستگاه‌های نیمه شمالی خط یک متروی تهران. فصلنامه مدیریت بحران و وضعیت‌های اضطراری، ۱۳(۱)، ۳۵-۵۶. https://cmj.ihu.ac.ir/article_206522_26e1083a7d4fe7264bed0c6e51af7.pdf۶۸۵.

[۲۳] مرتضوی، باقر، دانشور و روشن، ع. (۲۰۱۴). ارزیابی ریسک حریق در ایستگاه‌های خط ۱ مترو شهر تهران (پست یکسوساز) با روش تجزیه‌وتحلیل درخت خطا. مجله سلامت کار ایران، ۱۱(۲)، ۵۷-۶۲.

نشریه‌ی علمی شهر ایمن
JOURNAL OF RESILIENT CITY
(JRC)

Risk Assessment of Metro Stations in the Face of Man-Made Threats and Natural Hazards (Case Study: Metro Line One Stations of Tehran Metropolis)

Ali Mortezaei[1*]; Ali Azizi[2]; Gholamhossein Biabani[3]

1. M.Sc. – Researcher, Defensive Science Research Center, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Police Prevention Group, Amin Police Academy, Tehran, Iran (Corresponding Author)
3. Associate Professor, Criminal Investigation Group, Amin Police Academy, Tehran, Iran

Abstract:

The urban transportation infrastructure, especially the metropolitan subway system in Tehran, which is used daily by millions of people for commuting, is recognized as one of the most vital infrastructures of the country. Any disruption in the operation of the metro network can have widespread effects on other related infrastructures, including public transportation networks and the power distribution system, as well as lead to social discontent. In this regard, in the present research, the critical assets (including human, physical, and cyber assets) of Line 1 metro stations in the Tehran metropolitan area have been assessed for risk using the RAMCAP Plus method. A wide range of human-made threats and natural hazards, as well as their quantitative consequences, have been evaluated at these stations. By calculating the quantitative values of vulnerability and the probability of events occurring, the risk value has been quantitatively determined. The results indicate that among physical and cyber assets, the signaling system, train carriages, control room, escalators, the dedicated high-voltage power distribution network, and the water guidance system at the stations are the most vulnerable assets. For human assets, passengers and staff in platform areas, station entrances, and ticket halls are the most at risk. Furthermore, the most significant threats and hazards that ranked highest in terms of frequency and risk are, in order, terrorists (both suicide and group bombings), explosive devices in the station entrances, physical and cyber sabotage, pollution, and cyber theft for the terrorist threats' category, and floods and earthquakes for the natural hazards' category.

Keywords: Risk Assessment, Metro Stations of Tehran Metropolis, Threats, Hazards, RAMCAP Plus.

* Corresponding author: ***Alimortezaei1396@gmail.com***